船用トランスミッション用コンケーブコニカルギヤの開発*

(第1報, ヘリカルコンケーブコニカルギヤの創成法)

小松原 英範^{*1}, 三 留 謙 一^{*2}, 大 町 竜 哉^{*2}

Development of Concave Conical Gear Used for Marine Transmissions (1st Report, Generating Method of Helical Concave Conical Gear)

Hidenori KOMATSUBARA^{*3}, Ken-ichi MITOME and Tatsuya OHMACHI

^{*3} Niigata Converter Co. Ltd., Gejoh 405, Kamo City, Niigata, 959-1391 Japan

Conical involute gears used for marine transmissions are mostly helical conical involute gears. Besides these gears are not intersecting axis gears but also nonintersecting nonparallel axis gears. The contact between tooth surfaces of a pair of gears is the point contact. Hence the tooth surface durability is generally small. In order to overcome this weak point, one of the authors invented a new type of conical gear, which is called "Concave conical gear". Concave conical gear has higher tooth durability than the conventional conical involute gear. In this research, a new method to generate the helical Concave conical gear is presented. First the principle of generating method is introduced. Theoretical tooth surface is analyzed. Secondly test gears are ground. Tooth surfaces of the test gears are measured and compared with theoretical ones. Two tooth surfaces are in good agreement.

Key Words: Gear, Conical Involute Gear, Concave Conical Gear, Helical Concave Conical Gear Grinding, Niles-Type Grinding

1. 緒 言

船用トランスミッションは、一般にマリンギアと呼ばれている。マリンギアの構成を図1に示す。マリンギアは、船の推進用原動機の回転を減速してプロペラに伝達する歯車と、船を中立・前進・後進させるための湿式多板クラッチを有している。また、通常プロペラ軸は水平面に対して10°前後下へ傾けられて設置される。マリンギアには、入力軸(前進軸)、後進軸、出力軸の3軸があり、入力軸と出力軸は交差軸、後進軸と出力軸は食い違い軸となっている。

このマリンギアにおいては、従来、ヘリカルコニカルギヤが用いられている。マリンギアの歯車構成を図2に示す。前進ピニオンと出力ギヤは交差軸歯車、また後進ピニオンと出力ギヤは食い違い軸歯車として使用される。この場合、歯面間の接触は理論的に点接触であり、一般に歯面強度は小さい⁽³⁾。そこでその弱点を克服するために著者の一人は、コンケーブコニカルギヤと呼ぶ新しい歯車を考案し、その歯面をコンケー

ブ歯面と呼んでいる⁽¹⁾⁽²⁾。この新しい歯車は、従来のコニカルギヤよりも大きな動力を伝えることができる。図3にコンケーブ歯面を正規のコニカルギヤの歯面と比較して示す。図3において実線で示したのがコンケーブ歯面であり、破線で示したのがコニカルギヤの歯面である。この二つの歯面は、歯面上の接点の軌跡 v_0 の近傍で一致している。

Fig. 1 Angle-drive marine transmission

* 原稿受付 1999年1月18日。

^{*1} 正員, 新潟コンバータ(株) (☎ 959-1361 加茂市下条戊405)。

^{*2} 正員, 山形大学工学部 (☎ 992-8510 米沢市城南4-3-16)。

E-mail: nicokamo_d@mvd.biglobe.ne.jp

Fig. 2 Gear train

Fig. 3 Concave tooth surface in comparison with tooth surface of conical involute gear

Fig. 4 Tooth surface contact of conical involute gears

本研究は、歯面強度の高いマリンギヤ用コンケーブコニカルギヤの開発を目的としている。本報では、はじめにヘリカルコンケーブコニカルギヤの創成法を提示し、それに基づいて歯車を設計・製作する。そして本創成法の有効性を明らかにする。

2. コンケーブコニカルギヤの歯面間の接触

図4は仮想創成ラックを媒介としたコニカルギヤの歯面間の接触を示す。歯車1とラックは直線 l_1 上で接触し、歯車2とラックは直線 l_2 上で接触している。この図において、直線 l_1 および l_2 はインボリュートヘリコイドを創成する創成母線である。角 θ は歯車1と2の最小主曲率平面のなす角である⁽³⁾。

(a) In the case of conical involute gear (b) In the case of concave conical gear

Fig. 5 Approximate view of tooth surface contact

Fig. 6 Schematic view of gear grinding machine made for testing

コニカルギヤの歯面間の接触は図5(a)に示すように円筒どうしの接触に近似できる。これに対し、コンケーブコニカルギヤの歯面間の接触は図5(b)に示すように回転双曲面どうしの接触に近似できる。よってコンケーブコニカルギヤの歯面間の接触面積はコニカルギヤのそれよりも大きくなる⁽¹⁾。

3. ラック形回転工具による歯面の創成

3.1 歯面創成機構 ヘリカルコンケーブコニカルギヤをラック形回転工具で創成する。この歯車用歯車研削盤についてはさきに報告されているので⁽⁴⁾、要約して述べておく。この歯車研削盤はナイルスタイプのものである。しかしナイルス歯車研削盤とは異なり、工具を歯すじ方向に往復運動させないで歯車を研削する。図6に歯車研削盤の概略図を示す。このときの創成運動は歯車のピッチ円筒が仮想ラックのピッチ平面に対して転がることによって実現される。図7に一平面上で表したこの歯車の創成シミュレーションを示す。また図8には研削中の歯車を示している。

次に研削された歯面について述べる。図9にヘリカルコンケーブコニカルギヤを創成するラック形回転工具を、ヘリカルコニカルギヤを創成するラックと比較して示す。ここでは、歯車を歯車軸まわりに角速度 ω で回転させ、同時にラック形回転工具を ωr_b の速さで

Fig. 7 Generating simulation of concave conical gear based on Niles method

Fig. 8 Grinding of test gear 1

Fig. 9 Helical concave conical gear, conical-shaped wheel, and imaginary generating rack

y' 方向に並進させて、創成運動を実現する。以下では研削された歯面を、この創成運動によって創成された歯面として、解析する。

3・2 座標系 任意点 P を $P(X, Y, Z) = P(X_2, Y_2, Z_2)$ とするとき、 (X, Y, Z) と (X_2, Y_2, Z_2) の間には次式の関係がある。ここに M_{04} は座標変換マトリックスであり、角 ϕ は歯車の回転角である。

$$\begin{Bmatrix} 1 \\ X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = M_{04} \begin{Bmatrix} 1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$M_{04} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ X_{04} & A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ Y_{04} & A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ Z_{04} & A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$

- $o-xyz$: Stationary coordinate system set on grinding machine.
- $O-XYZ$: Rotating coordinate system set on gear to express gear tooth surface.
- $o'-x'y'z'$: Stationary coordinate system to define starting position of $O'-X'Y'Z'$
- $O'-X'Y'Z'$: Translating coordinate system.
- $O_3-X_3Y_3Z_3$: Coordinate system which coincides with $O'-X'Y'Z'$ at $\delta=0$.
- $O_2-X_2Y_2Z_2$: Coordinate system set on conical-shaped wheel to express wheel, translating along y' axis. This system coincides with $O_3-X_3Y_3Z_3$ at $\psi=0$.
- r_c : Pitch radius of the conical shaped wheel.
- r_b : Pitch radius of the gear.

$$\left. \begin{aligned} X_{04} &= (r_b + r_c \cos \delta) \cos \phi + r_b \phi \sin \phi \\ Y_{04} &= -(r_b + r_c \cos \delta) \sin \phi + r_b \phi \cos \phi \\ Z_{04} &= r_c \sin \delta \\ A_{11} &= \cos \delta \cos \phi \\ A_{12} &= \sin \delta \sin \phi \cos \phi + \cos \phi \sin \phi \\ A_{13} &= -\sin \delta \cos \phi \cos \phi + \sin \phi \sin \phi \\ A_{21} &= -\cos \delta \sin \phi \\ A_{22} &= -\sin \delta \sin \phi \sin \phi + \cos \phi \cos \phi \\ A_{23} &= \sin \delta \cos \phi \sin \phi + \sin \phi \cos \phi \\ A_{31} &= \sin \delta \\ A_{32} &= -\cos \delta \sin \phi \\ A_{33} &= \cos \delta \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

3・3 歯面創成 図10に歯車の右歯面を創成するラック形回転工具の円すい面を示す。図10より円すい面上の点Qの位置ベクトル $\mathbf{r}_2$ は以下のように表される。ここに u, v は曲面を表すパラメータである。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_2 &= X_2 \mathbf{I}_2 + Y_2 \mathbf{J}_2 + Z_2 \mathbf{K}_2 \\ X_2 &= X_2(u, v) = v \cos \alpha_0 \cos u \\ Y_2 &= Y_2(u, v) = v \sin \alpha_0 - a \\ Z_2 &= Z_2(u, v) = v \cos \alpha_0 \sin u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

図11に歯車の左歯面を創成するラック形回転工具の円すい面を示す。円すい面上の点Qの位置ベクトル

Fig. 10 Conical face for generating right tooth surface

Fig. 11 Conical face for generating left tooth surface

ル $\mathbf{r}_2$ は右歯面と同様に以下のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_2 &= X_2 \mathbf{I}_2 + Y_2 \mathbf{J}_2 + Z_2 \mathbf{K}_2 \\ X_2 &= X_2(u, v) = v \cos \alpha_0 \cos u \\ Y_2 &= Y_2(u, v) = a - v \sin \alpha_0 \\ Z_2 &= Z_2(u, v) = v \cos \alpha_0 \sin u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

さて以下では右歯面の創成だけを論ずる。式(3)を式(1)に代入すると右歯面を創成する円すい面は、座標系O- $X Y Z$ において以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u, v, \phi) \\ Y &= Y(u, v, \phi) \\ Z &= Z(u, v, \phi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

包絡面の条件は

$$\begin{vmatrix} \partial X / \partial u & \partial Y / \partial u & \partial Z / \partial u \\ \partial X / \partial v & \partial Y / \partial v & \partial Z / \partial v \\ \partial X / \partial \phi & \partial Y / \partial \phi & \partial Z / \partial \phi \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

これより $\phi = \phi(u, v)$ を求めると包絡面は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u, v, \phi(u, v)) \\ Y &= Y(u, v, \phi(u, v)) \\ Z &= Z(u, v, \phi(u, v)) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)を詳細に表したものが式(8)および(9)である。

$$\left. \begin{aligned} X &= A_1 \cos \phi + A_2 \sin \phi \\ Y &= -A_1 \sin \phi + A_2 \cos \phi \\ Z &= A_3 \\ \phi &= A_4 / A_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= v(\cos \alpha_0 \cos \delta \cos u + \sin \alpha_0 \sin \delta \sin \phi \\ &\quad - \cos \alpha_0 \sin \delta \cos \phi \sin u) \\ &\quad + r_c(\cos \delta - \tan \alpha_0 \sin \delta \sin \phi) + r_b \\ A_2 &= v(\sin \alpha_0 \cos \phi + \cos \alpha_0 \sin \phi \sin u) \\ &\quad - r_c \tan \alpha_0 \cos \phi + r_b \phi \\ A_3 &= v(\cos \alpha_0 \sin \delta \cos u - \sin \alpha_0 \cos \delta \sin \phi \\ &\quad + \cos \alpha_0 \cos \delta \cos \phi \sin u) \\ &\quad + r_c(\tan \alpha_0 \cos \delta \sin \phi + \sin \delta) \\ A_4 &= v(\sin \delta \sin u - \cos \delta \cos \phi \cos u) \\ &\quad + r_c \tan \alpha_0(\sin \alpha_0 \cos \delta \cos \phi \cos u \\ &\quad - \sin \alpha_0 \sin \delta \sin u) \\ &\quad + r_c(\sin \alpha_0 \cos \delta \sin \phi \sin u \\ &\quad - \cos \alpha_0 \cos \delta \cos \phi) \\ A_5 &= r_b(\sin \alpha_0 \cos \delta \cos u - \cos \alpha_0 \sin \delta \sin \phi \\ &\quad - \sin \alpha_0 \sin \delta \cos \phi \sin u) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式(8)および(9)は、円すい面工具によって創成された歯車の右歯面を表している。左歯面も、右歯面と同様に求められる。

Fig. 12 Rotating coordinate systems O-XYZ and stationary coordinate system o-xyz

Fig. 13 Tooth section profile cut through plane of contact with base cylinder

4. 歯面輪郭

正規のコニカルギヤの歯面はインボリュートヘリコイドであるため、図3に示した母線方向の輪郭は直線 l となる。しかしヘリカルコンケーブコニカルギヤの場合、母線方向の輪郭は曲線 l' となる。これらの直線 l と曲線 l' は、基礎円筒接平面によって切断した歯面輪郭である。ここでは創成された歯面の理論輪郭 l' を求める。

式(8)および(9)においては、創成された歯面を歯車に固定された回転座標系O-XYZで表していたが、これを図12に示す静止座標系o-xyzで表す。

図12より

$$\begin{cases} x = X \cos \phi_0 - Y \sin \phi_0 \\ y = X \sin \phi_0 + Y \cos \phi_0 \\ z = Z \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \cos \phi_0 = r_g / r_b \\ \sin \phi_0 = \sqrt{r_b^2 - r_g^2} / r_b \end{cases} \quad (11)$$

式(10)に基礎円筒接平面の式(12)を代入すると u と v の関係が得られる。これより得られた u と v を y, z に代入することにより図13のような理論輪郭が

Table 1 Basic dimensions of test gears

	m	α_0	ψ	δ	z	r_c
Gear 1	3	30	15	30	32	72
Gear 2	3	30	0	30	32	72

Fig. 14 Principle of measuring tooth section profile cut through plane of contact with base cylinder

Fig. 15 Apparatus of measuring tooth section profile using profilometer

得られる。測定輪郭との比較を容易にするためにこの輪郭を $o_2-y_2z_2$ 座標系に変換する。

$$x = r_g \quad (12)$$

$$\begin{cases} y_2 = \left\{ (1/r_b)(A_1 V + A_2 W) - \sqrt{r_b^2 - r_g^2} \right\} \sin \beta_g - A_3 \cos \beta_g \\ z_2 = \left\{ (1/r_b)(A_1 V + A_2 W) - \sqrt{r_b^2 - r_g^2} \right\} \cos \beta_g + A_3 \sin \beta_g \\ V = \sqrt{r_b^2 - r_g^2} \cos \phi - r_g \sin \phi \\ W = \sqrt{r_b^2 - r_g^2} \sin \phi + r_g \cos \phi \end{cases} \quad (13)$$

(a) Right tooth surface

(b) Left tooth surface

Fig. 16 Theoretical and measured profile of test gear 1

(a) Right tooth surface

(b) Left tooth surface

Fig. 17 Theoretical and measured profile of test gear 2

5. 実験検証

本実験で用いた歯車の基本諸元を表1に示す。

次に基礎円筒接平面によって歯を切断したときに現れる輪郭を、表面粗さ計で測定した。この測定原理を図14に示し、その装置を図15に示す。この装置では、表面粗さ計のベースの上にX-Yテーブルを置き、さらにその上に歯車支持台を載せている。そしてこの支持台をX方向に移動させることにより、基礎円筒接平面をプローブの位置に一致させる。次に歯車軸を基礎円筒ねじれ角 β_0 だけ傾け、プローブをY軸方向に送ることによって、歯面を測定する。

この測定法により測定された歯面輪郭を理論輪郭と比較して図16(a), (b)および図17(a), (b)に示す。図16, 17に示すように理論輪郭と測定輪郭は非常によく一致している。

6. 結 言

(1) ラック形回転工具を用いたヘリカルコンケー

ブコニカルギヤの創成法を開発した。これにより設計どおりのコンケーブ歯面を創成することが可能となった。

(2) ホブやねじ状砥石で歯車を創成する場合でも、ねじ状工具を空間に運動させ、ラック形回転工具を仮想的に実現させることができれば、本創成法を適用できる。

文 献

- (1) Mitome, K., Concave Conical Gear, *Int. conf. motion Transm.*, 3 D 2 (1991), 601, Hiroshima, Japan.
- (2) 三留謙一, コンケーブ円すい形歯車, 日本特許第2003073号, 特許公報, 特公平7-33863, 日本国特許庁.
- (3) 三留謙一, 円すい形インボリュート歯車の研究(第3報, 一对の歯車のかみ合いについて), 機論, 51-463, C(1985), 624.
- (4) 大町竜哉・ほか3名, コンケーブコニカルギヤ用歯車研削盤の試作研究, 機論, 65-639, C(1999), 掲載予定.